*Ferdowsi Civil Engineering, 36, 4, 2024. (95-110)*

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

# Experimental Evaluation of the Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete

Research Article

Ramin Chaleshi[1], Babak Golchin[2], Ramin Meshkabadi[3]

*DOI: 10.22067/jfcei.2024.79344.1186*

## 1- Introduction

In our country, the technology of making pavements with roller-compacted concrete has received less attention in the past decades due to the low cost of bitumen. However, roller-compacted concrete offers easy, fast, and relatively low-cost construction, as well as good resistance and durability. One drawback of concrete mixtures is their brittleness, which is typically addressed by using steel bars in conventional concrete structures. Roller-compacted concrete pavements, however, do not use steel bars, leading to the appearance of various cracks. To improve the behavior of roller-compacted concrete pavements, one solution is to use different types of fibers. Steel fibers, in particular, offer technical and economic advantages and can be added to the concrete mixture to enhance its characteristics. This process involves adding a percentage of short steel fibers to the concrete, which are randomly scattered in different directions within the mixture, resulting in improved concrete characteristics compared to the concrete without fibers.

In roller-compacted concrete pavements, the brittle and semi-brittle behavior of concrete allows for the application of fracture mechanics concepts to investigate crack growth. Laboratory samples are subjected to various loading modes, including pure tension, pure shear, and a combination of tension and shear. These modes are referred to as mode I (pure tension), mode II (pure shear), and mode I/II (combined tension and shear). The principles of linear elastic fracture mechanics can effectively predict crack growth and propagation. As a crack reaches a critical limit, it suddenly expands, causing the sample to become unstable and break. This research also explores the impact of steel fibers on the fracture strength, compressive strength, and tensile strength of rolled concrete. Semicircular samples with edge cracks are used in a three-point bending test to simulate pure tension, pure shear, and their combination. Moreover, the compressive and tensile strength of rolled concrete samples with steel fibers were evaluated after 7 and 28 days.

## 1- Materials and Methods

In this study, the effect of variable percentages of steel fibers on the mechanical properties of roller-compacted concrete was investigated. The aggregates used in the construction of roller-compacted concrete pavement must be according to ASTMC33 standards. Water was sourced from the water supply network of Tabriz city. Type II cement from Tabriz Sufian Cement Factory, with a specific gravity of 3.19 gr/cm$^3$ was utilized according to ASTM-C 188-89 standard. Steel fibers (54 mm in length and 0.8 mm in diameter) were incorporated in roller-compacted concrete samples. The mixing plan was determined based on the Iran No. 354 standard and the PCA standard. The mixing design method employed in this research involved different concrete tests. In all concrete methods, the water-to-cement ratio was carefully considered to achieve the desired compressive strength or durability requirements. The mixture components were determined to ensure that the mixture was suitable for compaction with a vibrating roller. This suitability was assessed by determining the time required for sample compaction under load and in vibration mode.

We investigated four different mixing designs, each producing eight samples, making a total of 32 samples. The amount of aggregates remained constant across all mixing plans. The cement grade used was 350 kg/m$^3$, with a water-to-cement ratio of 0.42. For the first mixing design, samples were tested without fibers, resulting in a VB time of 33 seconds. Subsequent mixing designs involved roller-compacted concrete with 0.1%, 0.3%, and 0.5% weight percentages, yielding VB times of 30, 40, and 45 seconds, respectively.

The uniaxial compressive strength test was conducted according to ASTM C39/C39M-03 standards, with a loading rate of 0.14-0.34 MPa/s. To assess the tensile strength of the rolled concrete, cylindrical samples were prepared and tested after 7 and 28 days, with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm. Strength testing was carried

*Manuscript received November 24, 2022, Revised, February 5, 2024, Accepted, April 12, 2024.

[1] MSc in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

[2] Corresponding author, Assistant Professor in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. **Email**: b.golchin@uma.ac.ir.

[3] Assistant Professor in Mechanical Engineering, Faculty of Advanced Technologies, University of Mohaghegh Ardabili, Namin, Iran.

out using a universal device with a 15-kilonewton capacity and under static loading with a constant rate.

To model the sample in Abaqus software, a sample with the dimensions of (a=15 mm, R=50 mm, t=30 mm, P=1000 N) was utilized as shown in Fig. 1. The entire model was implemented using approximately 2800 8-node rectangular elements. A very fine meshing technique was employed to achieve more accurate results for meshing. The crack angle was set to 0° for pure tension mode, 49° for pure shear mode, and 15°, 30°, 40°, and 45° for combined tensile and shear modes. The $M^e$, which indicates the contribution ratio of modes I and II in different loading modes of the combined mode, is defined by equation (1).

$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1}\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right) \quad (1)$$

In mode I, the value of this parameter is one, while it is zero in mode II.

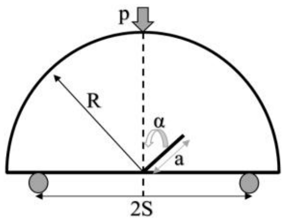



**Fig. 1. Sample for fracture resistance test**

## 2- Results

Fig. 2 illustrates the results of compressive strength testing for roller-compacted concrete with varying percentages of steel fibers. The data from Fig. 2 indicates that the addition of fibers at different percentages has led to an increase in the compressive strength of the rolled concrete. The results demonstrate that higher percentages of steel fibers result in increased compressive strength after both 7 and 28 days. This behavior is attributed to the ability of the fibers to restrict and prevent crack propagation. By limiting the spread of cracks, the concentration of stress in the cracked area decreases, ultimately slowing down the growth of cracks in fiber-reinforced concrete.

By adding steel fibers in different percentages to 7-day roller-compacted concrete without fibers, the compressive strength of the concrete increased by 10%, 24%, and 37%. Similarly, the compressive strength of 28-day roller-compacted concrete increased by 12%, 15%, and 36% with the addition of steel fibers. This suggests that steel fibers have led to a rise in the compressive strength of roller-compacted concrete after both 7 and 28 days of curing. The increase in the compressive strength of 7-day roller-compacted concrete ranges from 10% to 37%, while the increase in 28-day strength ranges from 12% to 36%. It can be concluded that the effect of steel fibers on the compressive strength of 7-day roller-compacted concrete is slightly greater than that of 28-day rolled concrete.

The tensile strength test results are presented in Fig. 3, indicating a general increase in the tensile strength of the roller-compacted concrete samples with the addition of steel fibers within the tested range. The 7-day tensile strength rose with a range of 4%-26%, while the 28-day tensile strength increased with a range of 14%-39%. The highest effect on the tensile strength of roller-compacted concrete is observed with 0.5% steel fibers compared to other ratios. This improvement in tensile strength may be attributed to the ability of the steel fibers to more uniformly and effectively distribute the incoming load within the roller-compacted concrete structure.

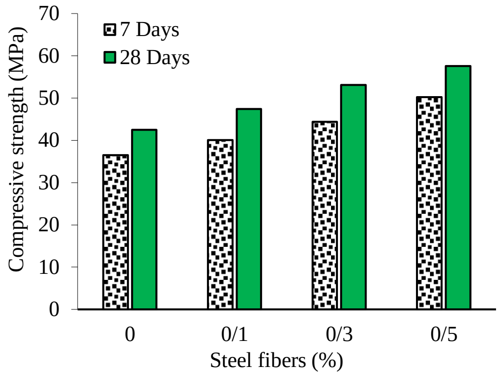



**Fig. 2. Compressive strength of roller-compacted concrete containing steel fibers**

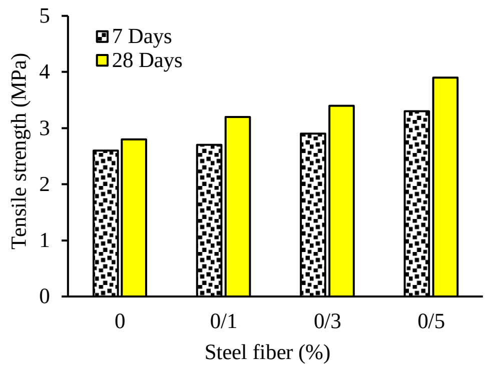



**Fig. 3. Tensile strength of roller-compacted concrete containing steel fibers**

## 3- Conclusions

Based on the experimental and analytical results, the following conclusions could be drawn:

- The compressive and tensile strength values of roller-compacted concrete samples improve after 7 and 28 days when steel fibers are present. This improvement in resistance is directly proportional to the rise in fiber percentage, up to 0.5%.
- The failure load of all roller-compacted concrete samples increases with higher percentages of steel fibers in all loading modes.
- The highest fracture resistance value is observed in pure tensile mode, while the lowest value occurs in pure shear.
- The most suitable amount of steel fibers for fracture resistance is 0.3% of rolled concrete, as there is no significant difference in fracture resistance beyond this amount. However, for increasing tensile and compressive strength, the most appropriate amount of fibers is 0.5% of rolled concrete.

مهندسی عمران فردوسی، ۳۷، ۱، ۱۴۰۳. (۱۱۰-۹۵)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن بتن ایران

انجمن مهندسی روسازی ایران

# بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی*

مقاله پژوهشی

رامین چالشی[۱] بابک گلچین[۲] رامین مشک آبادی[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.79344.1186

**چکیده** *بتن غلتکی به دلیل سرعت اجرا، هزینه نسبتا پایین، عدم استفاده از میلگرد، مقاومت و دوام کافی در ساخت بسیاری از پروژه‌های عمرانی مانند روسازی راه‌ها، محوطه‌های پارکینگ، سدسازی، کف‌سازی محوطه‌های صنعتی مورد توجه قرار گرفته است. رفتار ترد و شکننده بتن غلتکی این ایده و فکر را ایجاد می‌کند که الیاف فولادی شاید بتوانند رفتار مکانیکی آن را بهبود دهند. در این پژوهش، اثر الیاف فولادی بر مقاومت شکست، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن غلتکی بررسی شد. در آزمایش مقاومت شکست، از نمونه‌های نیم‌دایره‌ای با ترک لبه‌ای و تحت بارگذاری خمش سه‌نقطه‌ای برای شبیه‌سازی وضعیت کشش خالص، برش خالص و ترکیب آن‌ها استفاده گردید. مقاومت فشاری و کششی ۷ و ۲۸ روزه نمونه‌های بتن غلتکی در حضور الیاف فولادی نیز ارزیابی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که افزودن الیاف فولادی به مقدار ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ درصد، مقاومت فشاری ۲۸ روزه این نمونه‌ها را به ترتیب ۱۲، ۱۵ و ۳۶ بهبود می‌دهد. این افزایش برای مقاومت کششی نمونه‌ها به ترتیب ۱۴، ۲۱ و ۳۹ درصد است. با افزایش درصد الیاف فولادی، بار شکست تمام نمونه‌ها در تمام مودهای بارگذاری افزایش می‌یابد. افزایش بار شکست موجب مقاومت بیشتر در برابر رشد ترک می‌شود. مناسب‌ترین مقدار الیاف فولادی برای بهبود مقاومت شکست بتن غلتکی به مقدار ۰/۳ درصد کل وزن نمونه بتنی در مودهای مختلف بارگذاری شناسایی شد. این عدد برای مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها به مقدار ۰/۵ درصد است.*

**واژه‌های کلیدی** بتن غلتکی، الیاف فولادی، استحکام، مقاومت شکست.

## Experimental Evaluating the Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Roller-compacted Concrete

Ramin Chaleshi Babak Golchin Ramin Meshkabadi

**Abstract** *The use of roller-compacted concrete in construction projects, such as road paving, parking lots, dam construction, and industrial pavement, is attributed to its quick implementation, relatively low cost, and sufficient strength without the need for steel bar. However, the brittle nature of roller-compacted concrete prompted an investigation into how steel fibers could improve its mechanical behavior. This research focused on the effect of steel fibers on fracture strength, compressive strength, and tensile strength of roller-compacted concrete. The study involved testing semicircular samples with edge cracks under three-point bending loading to simulate pure tension, pure shear, and their combination. Additionally, the compressive and tensile strength of roller-compacted concrete samples with steel fibers were evaluated at 7 and 28 days. The laboratory results showed that adding 0.1%, 0.3%, and 0.5% steel fibers improved the 28-day compressive strength by 12%, 15%, and 36%, respectively, and the tensile strength by 14%, 21%, and 39%, respectively. Moreover, the failure load of all samples increased in all loading modes with higher percentages of steel fibers, leading to greater resistance to crack growth. The study identified 0.3% of steel fibers as the most effective amount for improving the fracture resistance of roller-compacted concrete in different loading modes, while the optimal percentage for enhancing the compressive and tensile strength was determined to be 0.5%.*

**Key words** Roller-compacted Concrete, Steel Fibers, Strength, Fracture Toughness.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۸/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۱/۲۵ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اهر.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

(۳) استادیار، دانشکده فناوری‌های نوین، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

**Email:** b.golchin@uma.ac.ir

**مقدمه**

هزینه‌های ساخت و نگه‌داری راه‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترها در سرمایه‌گذاری‌های بخش حمل و نقل است. این هزینه‌ها به مقدار زیادی از نوع روسازی اثر می‌پذیرد. در کشور ما به دلیل ارزان بودن قیر در دهه‌های گذشته فناوری ساخت روسازی با بتن و علی‌الخصوص بتن غلتکی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سهولت و سرعت ساخت، هزینه نسبی پایین در ساخت، مقاومت و دوام بتن غلتکی، آن‌ها را به یک گزینه قابل قبول در ساخت لایه‌های روسازی راه‌ها تبدیل کرده است. یکی از معایب مخلوط‌های بتنی، شکل‌پذیری نامناسب و شکنندگی آن‌ها است. این عیب در اکثر سازه‌های بتنی با میلگردهای فولادی برطرف می‌شود. در روسازی‌های بتن غلتکی از میلگردهای فولادی استفاده نمی‌شود [1]. این امر باعث به وجود آمدن ترک‌های مختلف در این سازه‌ها می‌گردد. یکی از راه‌حل‌های موجود برای بهبود رفتار روسازی‌های بتن غلتکی، استفاده از انواع الیاف می‌باشد [2]. الیاف فولادی به دلیل مزایای مختلف فنی و اقتصادی، کاربرد زیادی در سازه‌های بتنی دارند. بتن حاوی الیاف فولادی، شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی، آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی کوتاه می‌باشد که الیاف به صورت کاملا اتفاقی در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده‌اند. وجود الیاف فولادی مشخصات بتن را نسبت به حالت بدون الیاف بهبود می‌دهد [3]. در روسازی بتن غلتکی از مواد حباب‌زا استفاده نمی‌شود. مواد حباب‌زا می‌توانند شبکه ریزی از حباب‌های هوا را در بتن ایجاد کرده و کارایی و مقاومت بتن را در برابر شرایط ذوب و یخبندان بهبود دهند. در بتن غلتکی از غلتک‌های سنگین برای تراکم بتن استفاده می‌شود. این عمل به کاهش حفرات هوا در بتن کمک می‌کند، چگالی و مقاومت آن را افزایش می‌دهد. استفاده از مواد حباب‌زا با فرایند تراکم تداخل ایجاد می‌کند و از رسیدن بتن غلتکی به چگالی مورد نظر جلوگیری می‌کند. در نتیجه مقاومت این بتن را کاهش می‌دهد.

در روسازی‌های بتن غلتکی، به دلیل رفتار ترد و نیمه‌ترد بتن می‌توان از مفاهیم مکانیک شکست در بررسی رشد ترک استفاده کرد. در این زمینه با استفاده از انواع مودهای بارگذاری، نحوه جدا شدن و از هم گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی بررسی می‌گردد. این بارگذاری‌ها در سه حالت کشش خالص، برش خالص و ترکیب کشش و برش خالص می‌توانند اعمال شوند. بدین منظور کشش خالص معمولا با نام مود I یا مود کشش خالص، برش خالص به صورت مود II یا مود برشی خالص و ترکیب کشش و برش با نام مود ترکیبی یا مود I/II نامیده می‌شوند. استفاده از اصول مکانیک شکست الاستیک خطی می‌تواند در پیش‌بینی رشد و انتشار ترک مؤثر باشد. با رشد ترک و رسیدن به یک حد بحرانی ترک به‌طور نا گهانی گسترش یافته و نمونه ناپایدار و گسیخته خواهد شد [4].

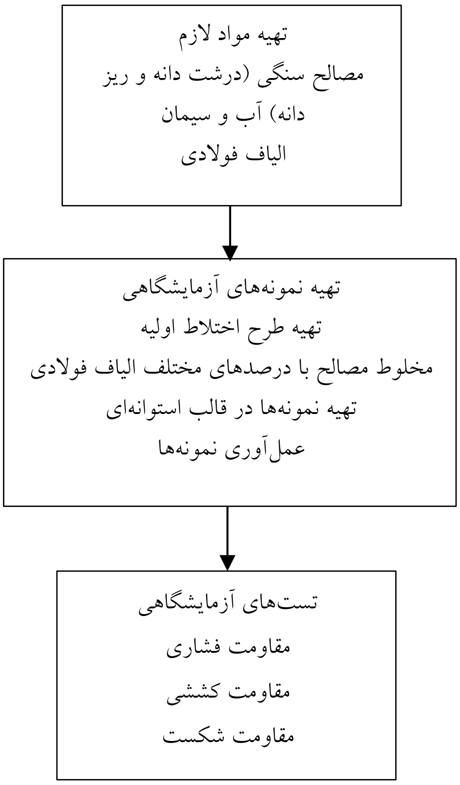
در پژوهش‌های اخیر، اثر الیاف فولادی بر رفتار بتن بررسی شده است. وظیفه‌خواه و مناف‌پور به بررسی مقاومت کششی بتن مسلح با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در نسبت‌های مختلف پرداختند [5]. الیاف فولادی به میزان ۰، ۰/۳، ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ و الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰، ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجم بتن مورد استفاده قرار گرفتند. در کلیه مخلوط‌ها از سیمان تیپ ۱ استفاده شد و نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ بود. نتایج نشان داد که مقاومت کششی بتن مسلح با الیاف فولادی با افزایش درصد الیاف از ۰ تا ۰/۶ درصد به مقدار کمی افزایش پیدا می‌کند، ولی با افزایش از ۰/۶ الی ۱/۲ درصد بیشتر تغییر می‌کند. مقاومت کششی نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به میزان ۰/۲ درصد در سنین ۷ و ۲۸ روزه نسبت به نمونه بدون الیاف افزایش می‌یابد ولی به طور کلی نمونه‌های دارای ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به نمونه بدون الیاف دارای افزایش مقاومت چشم‌گیری نیست [5]. شاد دل و همکاران [6] الیاف فولادی را در تهیه بتن سبک حاوی پرلیت، لیکا و میکروسیلیس استفاده کردند. تحقیق ایشان نشان داد که این الیاف مقاومت فشاری بتن سبک را بهبود می‌دهد. Leone و همکاران [7]، از درصدهای کم الیاف فلزی بازیافتی در بررسی رفتار برشی مخلوط‌های بتنی استفاده کردند. یافته‌های پژوهش ایشان، استفاده از این الیاف را در مخلوط‌های بتنی پیشنهاد داد. در مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار بتن غلتکی، لاهوجیک و همکاران، از دو الیاف فلزی و چند الیاف مصنوعی دیگر در مقدار ۰/۲ و ۰/۴ درصد حجمی در ساخت مخلوط‌ها استفاده کردند. بتن‌های حاوی این الیاف، مشخصات شکست مشابه و یا مشخصات بهتری را نسبت به بتن‌های غلتکی بدون الیاف نشان دادند [2]. سوکونتاسوکول و همکاران[8] از الیاف فولادی در مقدار ۰/۵ و ۱ درصد برای تهیه نمونه‌های بتن غلتکی

استفاده کردند. این الیاف توانستند مقاومت فشاری و خمشی بتن غلتکی را بهبود دهند. سیف الهی و محمدی [9] رفتار مکانیکی بتن غلتکی را در حضور صفر تا یک درصد الیاف فولادی به همراه افزودنی نانوسیلیکا بررسی کردند. در این پژوهش نیز رفتار مکانیکی بتن غلتکی بهبود یافت. ابوبکر و همکاران [10] نشان دادند که افزودن الیاف فولادی می‌تواند دوام بتن غلتکی را در حضور متاکائولین ارتقا دهد. به‌عنوان یک نتیجه از بررسی رفتار تحقیقات گذشته می‌توان تأثیر مثبت الیاف فولادی را در نمونه‌های بتنی مختلف و بتن غلتکی مشاهده کرد.

در سال‌های اخیر، بررسی رفتار شکست بتن‌های غلتکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [11-13]. علاوه بر بتن غلتکی، این رفتار در مخلوط‌های آسفالتی، در مدهای مختلف برش و کشش توسط علیها و همکاران [14] و گلچین و صفایی [15] بررسی شده است. در بررسی رفتار سنگ‌ها، این موضوع برای ترکیب برش و کشش توسط میرسیار و همکاران [16] مورد مطالعه قرار گرفته است. فخری و همکاران [11] به بررسی رفتار ترک در مخلوط‌های بتن غلتکی حاوی آسفالت بازیافت شده و خرده لاستیک پرداختند. در این پژوهش برای تولید مودهای مختلف بارگذاری از نمونه‌های خمشی چهارنقطه‌ای و نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار استفاده شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که میزان جذب انرژی در بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافت شده افزایش می‌یابد. رحمانی و همکاران[12] اثر نسبت آب به سیمان را بر رفتار شکست بتن غلتکی بررسی کردند. نتایج شکست نمونه‌ها نشان داد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقدار انرژی شکست کاهش می‌یابد. سنگون و همکاران [13] رفتار شکست بتن غلتکی را بر اثر تراکم درجا و در محل بررسی نمودند. نتایج نشان داد که میزان تراکم و مشخصات مصالح به کار رفته در ساخت بتن غلتکی بر مقاومت شکست آن اثر می‌گذارد.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، اثر درصدهای مختلف الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی بررسی می‌شود. بدین منظور الگوریتم روش تحقیق در شکل (۱) نمایش داده شده است.




شکل ۱ الگوریتم روش تحقیق

## مواد لازم برای تهیه نمونه‌ها

سنگدانه‌هایی که در ساخت روسازی بتن غلتکی استفاده می‌شود باید استانداردهای دانه‌بندی ASTMC33 را رعایت نماید. بدین منظور، دانه‌بندی شن مصرفی در تهیه نمونه‌های بتن غلتکی در جدول (۱)، خصوصیات درشت‌دانه مورد استفاده در جدول (۲) و دانه‌بندی ریزدانه مصرفی در جدول (۳) معرفی شده است. آب مورد نیاز از شبکه آب‌رسانی شهر تبریز تهیه شده است. سیمان مورد استفاده سیمان نوع II از کارخانه سیمان صوفیان تبریز با وزن مخصوص برابر با ۳/۱۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب مطابق استاندارد ASTM-C 188-89 می‌باشد. نتایج آنالیز شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول (۴) ارائه شده است. در تهیه نمونه‌های بتن غلتکی از الیاف فولادی دو سر قلاب با طول ۵۴ میلی‌متر و قطر ۰/۸ میلی‌متر استفاده شد. نسبت طول به عرض الیاف ۶۷/۵ و مقاومت کششی آن‌ها ۱۰۰۰ مگاپاسگال بودند. در شکل (۲) الیاف فولادی مذکور نشان داده شده است.

جدول ۱ دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه مصرفی

| اندازه الک (میلی‌متر) | ۲۵ | ۱۹ | ۱۲/۵ | ۹/۵ | ۴/۷۵ |
|---|---|---|---|---|---|
| محدوده مجاز مطابق ASTMC33 | ۱۰۰ | ۹۰–۱۰۰ | ۴۵–۷۰ | ۲۰–۵۷ | ۰–۱۰ |
| درصد عبوری از الک | ۱۰۰ | ۹۵ | ۴۵ | ۳۴ | ۰ |

جدول ۲ خصوصیات مصالح درشت‌دانه مورد استفاده

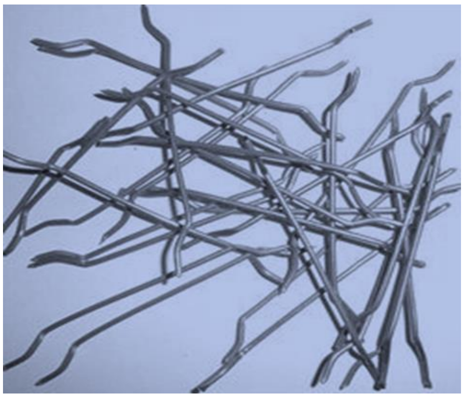
| استاندارد مربوطه | مشخصات درشت‌دانه | |
|---|---|---|
| ASTM C137 | حداکثر اندازه درشت‌دانه | ۱۹ میلی‌متر |
| ASTM C127 | وزن مخصوص خشک | ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب |
| ASTM C131 | درصد سایش لوس‌آنجلس | ۱۲/۵ |
| ASTM D5821 | درصد شکستگی مصالح روی الک نمره ۴ در دو جبهه | ۸۲ |

جدول ۳ دانه‌بندی مصالح ریزدانه مصرفی

| اندازه الک (میلی‌متر) | ۴/۷۵ | ۲/۳۶ | ۱/۱۸ | ۰/۶۰ | ۰/۳۰ | ۰/۱۵ | ۰/۷۵۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| محدوده مجاز مطابق ASTMC33 | ۹۷–۱۰۰ | ۸۲–۱۰۰ | ۵۳–۸۷ | ۲۸–۶۵ | ۱۰–۳۴ | ۳–۱۷ | – |
| درصد عبوری از الک | ۱۰۰ | ۷۷ | ۶۳ | ۵۴ | ۲۷ | ۸ | ۳ |

جدول ۴ مشخصات شیمیایی سیمان نوع II مورد استفاده در این تحقیق

| ترکیب شیمیایی سیمان | درصد موجود در سیمان مصرفی |
|---|---|
| $SiO_2$ | ۲۱/۲۲ |
| $Al_2O_3$ | ۴/۷۱ |
| $Fe_2O_3$ | ۳/۷۵ |
| CaO | ۶۲/۵۹ |
| MgO | ۳/۰۹ |
| $SO_3$ | ۱/۷۸ |
| $Na_2O$ | ۰/۱۸ |
| $K_2O$ | ۰/۵۸ |



شکل ۲ الیاف فولادی مورد استفاده

## طرح اختلاط

با توجه به اینکه نوع بتن در این تحقیق از نوع بتن غلتکی می‌باشد برای تعیین طرح اختلاط از استاندارد نشریه شماره ۳۵۴ ایران و استاندارد PCA استفاده گردید. روش‌های طرح اختلاط بتن غلتکی به دلیل سفت بودن مخلوط و نیز دانه‌بندی متمایز آن، با روش‌های به کار رفته برای بتن‌های معمولی متفاوت است. روش طرح اختلاط استفاده شده در این تحقیق، اختلاط با استفاده از آزمایش‌های روانی بتن است. در کلیه روش‌های بتنی جهت دست‌یابی به مقاومت فشاری طرح یا الزامات دوام نسبت آب به مواد سیمانی مد نظر قرار می‌گیرد و همچنین اجزای مخلوط به گونه‌ای تعیین می‌شوند که کارایی مخلوط جهت تراکم با غلتک ویبره‌ای مناسب باشد. این کارایی بر پایه انجام آزمایش روانی به روش تعیین زمان لازم جهت تراکم نمونه تحت سربار و در حالت ارتعاشی (زمان وی‌بی اصلاح شده) تعیین می‌گردد.

در این تحقیق چهار نوع طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفته است که در هر طرح اختلاط ۸ نمونه و در مجموع ۳۲ نمونه ساخته شده است. در تمامی طرح اختلاط‌ها میزان سنگ‌دانه‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ در نظر گرفته

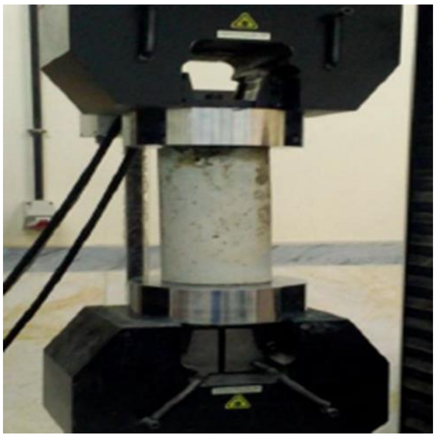
شده است. ابتدا شن و ماسه داخل میکسر ریخته شده، در حین عمل اختلاط، به تدریج سیمان اضافه می‌گردد و در پایان الیاف فولادی به تدریج به داخل مخلوط‌کن ریخته می‌شود. پس از ریختن تمامی مواد تشکیل‌دهنده به داخل مخلوط‌کن ۱/۵ دقیقه مواد مخلوط می‌شوند. بتن غلتکی داخل ظرف استوانه‌ای فلزی که روی میز قابل ارتعاش قرار دارد، ریخته می‌شود و وزنه استوانه‌ای فلزی که قطر آن کوچک‌تر از قطر ظرف است روی آن قرار داده می‌شود. سپس میز مرتعش کننده روشن می‌شود و زمان لازم از شروع ارتعاش تحت سربار تا رؤیت خمیر سیمان بیرون آمده از بتن غلتکی در محیط وزنه استوانه‌ای اندازه‌گیری می‌شود که این به منزله دستیابی به تراکم مناسب است. در طرح اختلاط اول که نمونه‌های اخذ شده از آن برای انجام آزمایش بدون الیاف به کار رفته است زمان وی‌بی ۳۳ ثانیه به دست آمده است. این زمان برای طرح اختلاط بتن غلتکی با درصدهای ۰/۱، ۰/۳ و ۰/۵ (درصد وزن بتن غلتکی) به ترتیب ۳۰، ۴۰ و ۴۵ ثانیه به دست آمده است. در جدول (۵) طرح اختلاط مصالح نشان داده شده است. پس از ساخت مخلوط، بتن در داخل قالب‌ها ریخته شد و پس از ۲۴ ساعت از ساخت نمونه‌ها قالب‌ها باز شده و در آب معمولی ۲۰ درجه سانتی‌گراد جهت عمل‌آوری قرار داده می‌شود. پس از گذشت زمان عمل‌آوری، بتن‌ها از آب خارج شده و پس از وزن کردن نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در هوای معمولی قرار داده می‌شود تا برای آزمایش‌ها آماده شوند. نمونه‌های استوانه‌ای در نهایت برش داده می‌شوند و ترک‌های لبه‌ای بر روی آن‌ها ایجاد می‌گردد.

جدول ۵ جزئیات طرح اختلاط بتن غلتکی مصرفی

| مصالح | سیمان $Kg/m^3$ | ماسه $Kg/m^3$ | شن $Kg/m^3$ | آب $Kg/m^3$ | سیمان/ آب $Kg/m^3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| مقدار | ۳۵۰ | ۱۲۹۸ | ۷۹۷ | ۱۳۰ | ۰/۴۲ |

## آزمایش‌های صورت گرفته

آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری طبق استاندارد ASTM C39/C39M-03 با نرخ بارگذاری بین ۰/۱۴ تا ۰/۳۴ مگاپاسکال بر ثانیه صورت پذیرفت. در این آزمایش نمونه استوانه‌ای بین فک‌های دستگاه مقاومت فشاری قرار داده می‌شود. مقدار این پارامتر برابر حداکثر تنشی است که نمونه استوانه‌ای بتواند تحمل کند. در شکل (۳) یک نمونه بتن غلتکی که مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته، نشان داده شده است.



شکل ۳ دستگاه آزمایش مقاومت فشاری

جهت انجام آزمایش مقاومت کششی بتن غلتکی نمونه‌های استوانه‌ای همانند نمونه‌های مقاومت فشاری به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر از طرح اختلاط بتن غلتکی، در سنین ۷ و ۲۸ روزه تهیه گردید. همچنین نمونه‌های بتن غلتکی در سه لایه و با لرزش میز ویبره با سربار ۹/۱ کیلوگرم به دست آمد. هر طرح اختلاط شامل ۴ نمونه بوده که دو عدد در سن ۷ روز و دو عدد در سن ۲۸ روز آزمایش شده است. شکل (۴) آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای بتن غلتکی را نشان می‌دهد.



شکل ۴ مقاومت کششی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای

انجام آزمایش شکست با استفاده از دستگاه یونیورسال با ظرفیت ۱۵ کیلو نیوتن و تحت بارگذاری استاتیک با نرخ ثابت بارگذاری صورت پذیرفت. این دستگاه قابلیت ترسیم منحنی بار

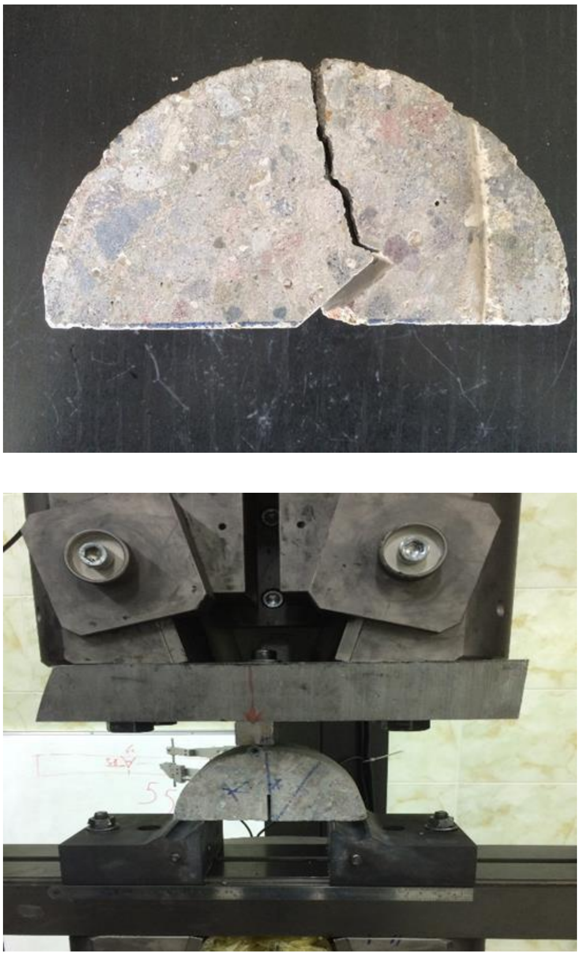
در مقابل جابه‌جایی، اندازه‌گیری بار بحرانی شکست مخلوط‌های بتنی را دارد. در شکل (۵) تصویری از چگونگی قرارگیری نمونه نیم‌دایره‌ای ترک‌خورده در دستگاه نشان داده شده است. در نمودار جابه‌جایی در برابر نیرو، با افزایش میزان جابه‌جایی، نیروی مورد نیاز افزایش یافته و پس از آن به سرعت کاهش می‌یابد. بار حداکثر به عنوان بار بحرانی شکست قرائت و یادداشت می‌شود.

قطعه نیم‌دایره شکل نشان داده شده در شکل (۶) تحت بار خمش نیم‌دایره نمونه مناسب‌تری برای انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت شکست بتن است چرا که قابلیت ایجاد ترک لبه‌ای و سهولت بارگذاری در آن امکان‌پذیر است. این نمونه علاوه بر سادگی هندسه آن توانایی ایجاد حالت‌های مود ترکیبی را دارد. برای ایجاد نمونه‌های خمش نیم‌دایره‌ای با استفاده از میز لرزه، مخلوط متراکم شده و سپس با برش نمونه‌های استوانه‌ای، نمونه ترک‌دار با مقطع نیم‌دایره‌ای تهیه می‌شود. می‌توان با کنترل تغییرات زاویه تمایل ترک ($\alpha$)، شرایط بارگذاری متفاوتی را از مود کشش خالص تا مود برش خالص به دست آورد. مود کشش خالص را می‌توان با زاویه ترک صفر درجه ایجاد کرد. همچنین در یک زاویه خاص، ضریب شدت تنش در مود I برابر صفر شده و نمونه در مود II قرار می‌گیرد. برای به دست آوردن ضرایب شکل نمونه‌های خمشی نیم دایره‌ای از رابطه (۱) استفاده می‌شود:

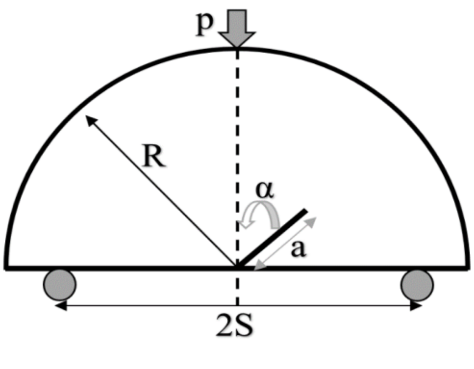
$$Y_i\left(\alpha,\frac{a}{R},\frac{S}{R}\right)=\frac{K_i}{\sqrt{\pi a}}\frac{2Rt}{P} \quad (۱)$$

که a بیانگر طول ترک، R شعاع دیسک، t ضخامت دیسک، $\alpha$ زاویه ترک نسبت به مرکز نیم‌دایره، i نشان دهنده نوع مود (i=I, II)، P بار متمرکز استاتیکی وارد بر قطعه از بالا، $Y_i$ ضریب شکل و $K_i$ ضریب شدت تنش می‌باشد. $Y_i$ به هندسه و بارگذاری نمونه بستگی دارد و با استفاده از آنالیز المان محدود به دست می‌آید. مقدار $Y_i$ برای نمونه با a/R=0.3 و S/R=0.43 با استفاده از شبیه سازی المان محدود به دست آمده و در شکل (۷) قابل مشاهده است.

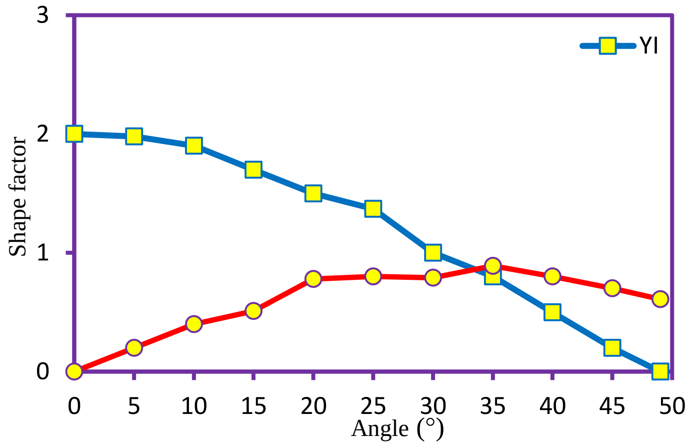
برای مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار آباکوس از نمونه شکل (۶) با (a=15 mm, R=50 mm, t=30mm, P=1000 N) استفاده گردید. برای المان‌بندی کل مدل نیز حدود ۲۸۰۰ المان مستطیلی ۸ گرهی استفاده شد. به منظور اخذ نتایج بهتر برای مش‌بندی نوک، از مش‌بندی بسیار ریز استفاده گردید.



شکل ۵ نمونه نیم دایره‌ای ترک‌خورده و دستگاه بارگذاری




شکل ۶ نمونه انتخاب شده برای آزمایش تعیین مقاومت شکست مخلوط‌های بتن غلتکی




شکل ۷ نتایج تحلیل عددی برای ایجاد انواع مودهای مختلف بارگذاری با استفاده از نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای

زاویه ترک برای ایجاد مود کشش خالص برابر صفر درجه، برای ایجاد مود برش خالص ۴۹° و برای ایجاد مودهای ترکیبی کششی و برشی زاویه ترک برابر با ۱۵، ۳۰، ۴۰ و ۴۵° در نظر گرفته شد. پارامتر $M^e$ که نسبت مشارکت مودهای I و II را در حالت‌های مختلف بارگذاری مود ترکیبی نشان می‌دهد به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$M^e = \frac{2}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right) \quad (۲)$$

مقدار این پارامتر در حالت مود I برابر با یک و برای مد II برابر صفر می‌باشد.

## نتایج و بحث

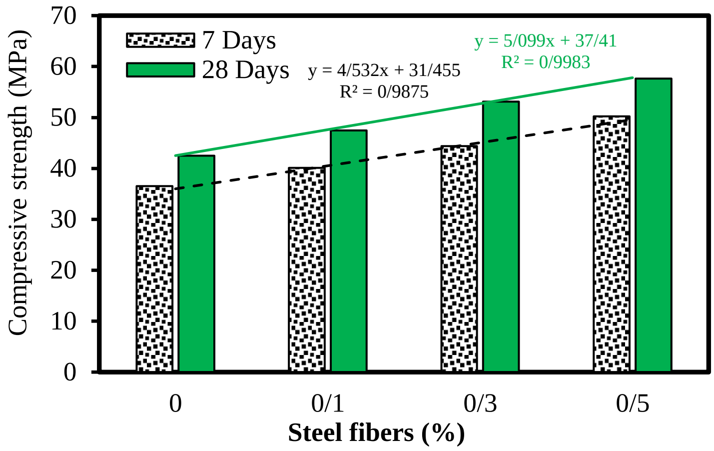
در این بخش ابتدا به تحلیل نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتن غلتکی ۷ و ۲۸ روزه حاوی الیاف و بدون الیاف پرداخته خواهد شد. سپس مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### مقاومت فشاری بتن غلتکی

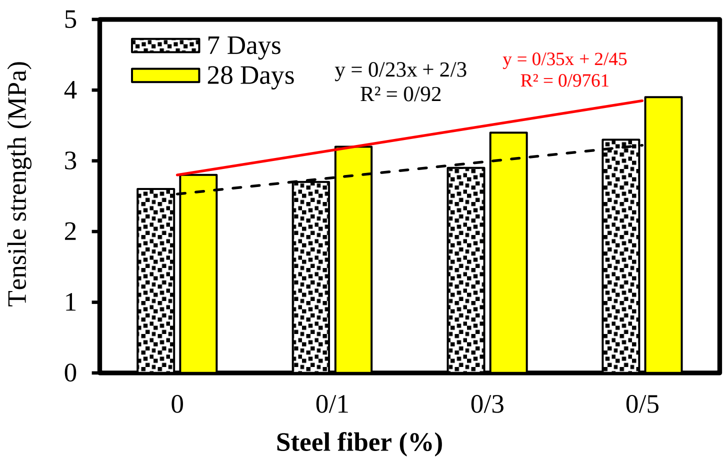
در شکل (۸) نتایج به دست آمده برای مقاومت فشاری بتن غلتکی در درصدهای مختلف الیاف فولادی نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) با اضافه شدن الیاف در درصدهای مختلف، مقاومت فشاری بتن غلتکی افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت فشاری در هر دو حالت ۷ و ۲۸ روزه می‌گردد. علت این رفتار را می‌توان در توانایی الیاف در محدود کردن و جلوگیری از گسترش ترک‌ها عنوان کرد. این محدود کردن ترک منجر به کاهش تمرکز تنش در ناحیه ترک‌خوردگی گردیده و در نهایت سبب کاهش سرعت رشد ترک در بتن غلتکی الیاف‌دار می‌گردد. سوکوتاسوکول و همکاران [8] بهبود مقاومت فشاری را برای نمونه‌های بتن غلتکی خود در حضور الیاف فولادی مشاهده کردند ، لیکن در پژوهش ایشان، مقدار بهبود مقاومت کمتر از این تحقیق است. شاید دلیل این امر طول کوتاه (۳۶ میلی‌متر) الیاف فولادی بوده است.

مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه بدون الیاف با افزودن الیاف فولادی در درصدهای مختلف، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی به مقدار ۱۰، ۲۴ و ۳۷ درصد شده است. این روند در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۲۸ روزه به ترتیب ۱۲، ۱۵ و ۳۶ درصد است. این امر نشان‌دهنده این است که الیاف فولادی منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی در هر دو حالت عمل‌آوری ۷ و ۲۸ روزه شده است. این افزایش مقاومت در مقاومت فشاری بتن غلتکی ۷ روزه از ۱۰ الی ۳۷ درصد و در مقاومت ۲۸ روزه بین ۱۲ الی ۳۶ درصد است. حال می‌توان گفت تأثیر الیاف فولادی بر عمل‌آوری بتن غلتکی ۷ روزه کمی بیشتر از عمل‌آوری بتن غلتکی ۲۸ روزه است.

ضابطه شماره ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه کشور در خصوص طراحی، اجرا و نگه‌داری روسازی بتنی راه‌ها، مقدار مقاومت فشاری بتن غلتکی را معمولا بین ۲۸ تا ۴۰ مگاپاسکال معرفی می‌کند [1]. این ضابطه بیان می‌دارد که مقاومت فشاری مشخصه ۲۸ روزه بتن غلتکی نباید کمتر از ۲۵ مگاپاسکال باشد. بررسی نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل (۸) نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی الیاف فولادی همگی دارای مقاومت بیشتر از ۲۵ مگاپاسکال هستند.




شکل ۸ مقاومت فشاری بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی




شکل ۹ مقاومت کششی بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی

در شکل (۸) ارتباط ریاضی بین درصد الیاف با مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود یک رابطه معناداری بین مقدار در صد الیاف با این مقاومت وجود دارد. شیب نمودار برای مقاومت ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت ۷ روزه است.

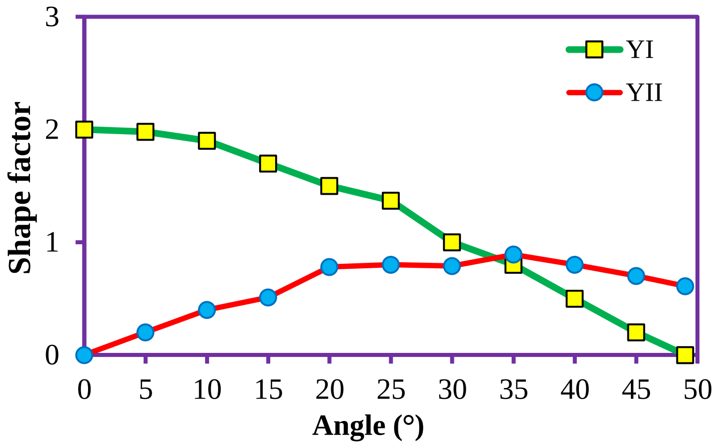
## مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت کششی در شکل (۹) نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که به طور کلی با اضافه نمودن الیاف فولادی در محدوده مورد آزمایش، مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی به طور کلی افزایش یافته است. این افزایش مقاومت در مقاومت کششی بتن غلتکی ۷ روزه از ۴ الی ۲۶ درصد و در مقاومت کششی ۲۸ روزه بین ۱۴ الی ۳۹ درصد است؛ بنابراین می‌توان گفت تأثیر الیاف فولادی در ۰/۵ درصد بیشترین مقدار نسبت به سایر نسبت‌ها در مقاومت کششی بتن غلتکی است. شاید دلیل بهبود مقاومت کششی این باشد که الیاف فولادی توانسته‌اند بارگذاری وارده را در ساختار بتن غلتکی به‌صورت همگن‌تر و مؤثرتر توزیع نمایند. از طرفی با ایجاد یک ساختار پل مانند، موجب حفظ اتصال ترک‌ها به هنگام وقوع تنش‌های کششی بحرانی شده‌اند. در پژوهش‌های دیگر نیز بهبود مقاومت کششی بتن غلتکی در حضور الیاف فولادی مشاهده شده است. سیف الهی و محمدی [9] در تحقیق خود بهبود مقاومت کششی بتن غلتکی را برای درصدهای ۰/۳۳، ۰/۶۷ و ۱ درصد الیاف فولادی گزارش کردند. لازم به ذکر است، ضابطه شماره ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، مقدار بحرانی مشخصی را برای مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی معرفی

نکرده است [1]. شکل (۹) یک رابطه خطی بین درصد الیاف با مقاومت کششی نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. در این شکل، مشابه مقاومت فشاری، شیب نمودار برای مقاومت کششی ۲۸ روزه بیشتر از مقاومت ۷ روزه است.

## بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی

در شکل (۱۰) نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار آباکوس برای ضرایب شکل نمونه خمشی نیم‌دایره‌ای نشان داده شده است. از این نتایج برای به دست آوردن مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی استفاده شد. در جدول (۶) مقادیر بار شکست نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف و الیاف‌دار برای نمونه های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای در مودهای مختلف بارگذاری شامل مود کشش خالص، مود ترکیبی و مود برش خالص نشان داده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف فولادی در تمام مودهای بارگذاری، بار شکست تمام نمونه‌های بتن غلتکی افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به توانایی الیاف فولادی در جلوگیری از گسترش ریز ترک‌ها و در نتیجه توزیع یکنواخت تنش‌ها نسبت داد. این افزایش بار سبب می شود که نمونه‌های بتن غلتکی ترک‌دار حاوی الیاف نسبت به نمونه‌های بدون الیاف در تمام مودهای بارگذاری مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک داشته باشد. در ضابطه شماره ۷۳۱ سازمان برنامه و بودجه کشور، مقدار بار بحرانی برای شکست نمونه‌های بتن غلتکی بیان نشده است [1].




شکل ۱۰ نمودار ضرایب شکل

جدول ۶ بار شکست نمونه‌های نیم‌دایره‌ای ترک‌دار زاویه‌ای بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

| زاویه ترک (°) | $M^e$ | میانگین بار شکست (۰ درصد الیاف) (KN) | میانگین بار شکست (۰/۱ درصد الیاف) (KN) | میانگین بار شکست (۰/۳ درصد الیاف) (KN) | میانگین بار شکست (۰/۵ درصد الیاف) (KN) |
|---|---|---|---|---|---|
| ۰ | ۱ | ۴/۵۵ | ۵/۸۶ | ۵/۹۳ | ۶/۰۹ |
| ۱۵ | ۰/۸۱ | ۴/۶۹ | ۶/۱۰ | ۶/۸۹ | ۷/۲۳ |
| ۳۰ | ۰/۵۷ | ۵/۱۹ | ۶/۶۱ | ۷/۷۳ | ۷/۶۲ |
| ۴۰ | ۰/۳۵ | ۵/۷۱ | ۷/۰۳ | ۸/۲۳ | ۸/۷۳ |
| ۴۵ | ۰/۱۸ | ۶/۱۴ | ۷/۱۹ | ۸/۶۶ | ۹/۱۲ |
| ۴۹ | ۰ | ۶/۵۹ | ۷/۴۲ | ۹/۲۰ | ۹/۴۱ |

## مقاومت شکست در مودهای مختلف بارگذاری

مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری در درصدهای مختلف الیاف فولادی در جدول‌های (۷) الی (۱۰) نشان داده شده است. شکل (۱۱) اثر مودهای مختلف را بر مقاومت شکست بتن غلتکی نشان می‌دهد. همان طور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود با انتقال از مود کشش خالص به برش خالص مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف و بدون الیاف کاهش می‌یابد؛ یعنی بیشترین مقدار مقاومت شکست در مود کشش خالص و کمترین مقدار در برش خالص اتفاق می‌افتد. همچنین اضافه شدن الیاف فولادی، سبب افزایش مقاومت شکست بتن غلتکی ترک‌دار در مودهای مختلف بارگذاری می‌شود. همچنین با توجه به شکل، با اضافه شدن برش، مقاومت شکست بتن غلتکی کاهش یافته تا اینکه در $M^e=0$ (برش خالص) مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف و بدون الیاف فولادی به کمترین مقدار خود نسبت به سایر مودهای بارگذاری می‌رسد. نتیجه مهمی که می‌توان از این مطلب گرفت این است که مود بحرانی برای شروع ترک در بتن غلتکی استفاده شده در این تحقیق، در $M^e=0$ (برش خالص) است. همچنین الیاف فولادی سبب افزایش مقاومت شکست بتن غلتکی در برابر رشد ترک در مودهای مختلف بارگذاری می‌شود.

تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت شکست بتن غلتکی ترک‌دار در شکل (۱۲) نشان داده شده است. این شکل در واقع نسبت مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی به بتن غلتکی بدون الیاف است. نسبت مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی فولادی به بتن غلتکی بدون الیاف همیشه بزرگ‌تر از ۱ است. این امر نشان‌دهنده این است که مقاومت شکست بتن غلتکی الیاف‌دار در برابر رشد ترک به مراتب بیشتر از مقاومت شکست مخلوط بدون الیاف است. افزودن الیاف فولادی بیشتر از مقدار ۰/۳ درصد تأثیر فراوانی در بهبود مقاومت شکست بتن غلتکی ندارد. از این رو، مقدار بهینه الیاف به دست آمده برای بهترین حالت مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری ۰/۳ درصد کل وزن بتن غلتکی است.

جدول ۷ مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی بدون الیاف در مودهای مختلف بارگذاری

| زاویه ترک (درجه) | ۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۴۰ | ۴۵ | ۴۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $M^e$ | ۱ | ۰/۸۱ | ۰/۵۷ | ۰/۳۵ | ۰/۱۸ | ۰ |
| $K_{If}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰/۵۹۸ | ۰/۵۵۶ | ۰/۳۵۹ | ۰/۲۰۱ | ۰/۰۸۹ | ۰ |
| $K_{IIf}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰ | ۰/۱۶۹ | ۰/۲۸۳ | ۰/۲۹۳ | ۰/۲۹۶ | ۰/۲۸۳ |
| $K_{eff}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰/۵۹۸ | ۰/۵۸۱ | ۰/۴۵۷ | ۰/۳۵۵ | ۰/۳۰۹ | ۰/۲۸۳ |

جدول ۸ مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۱ درصد الیاف در مودهای مختلف بارگذاری

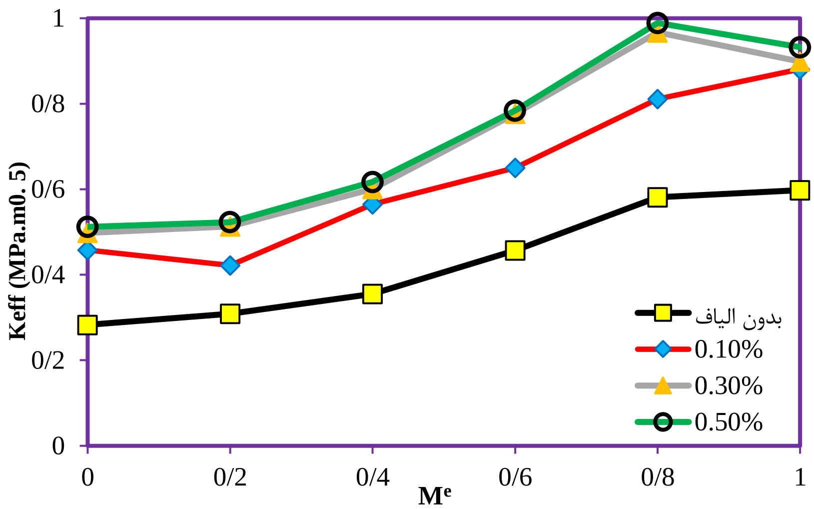
| زاویه ترک (درجه) | ۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۴۰ | ۴۵ | ۴۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $M^e$ | ۱ | ۰/۸۱ | ۰/۵۷ | ۰/۳۵ | ۰/۱۸ | ۰ |
| $K_{If}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰/۸۸۱ | ۰/۷۶۹ | ۰/۵۱۲ | ۰/۲۹۶ | ۰/۱۲۸ | ۰ |
| $K_{IIf}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰ | ۰/۲۵۹ | ۰/۴۰۱ | ۰/۴۸۲ | ۰/۴۰۳ | ۰/۴۵۸ |
| $K_{eff}\,(MPa.\sqrt{m})$ | ۰/۸۸۱ | ۰/۸۱۱ | ۰/۶۵۰ | ۰/۵۶۵ | ۰/۴۲۲ | ۰/۴۵۸ |

جدول ۹ مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی حاوی ۰/۳ درصد در مودهای مختلف بارگذاری

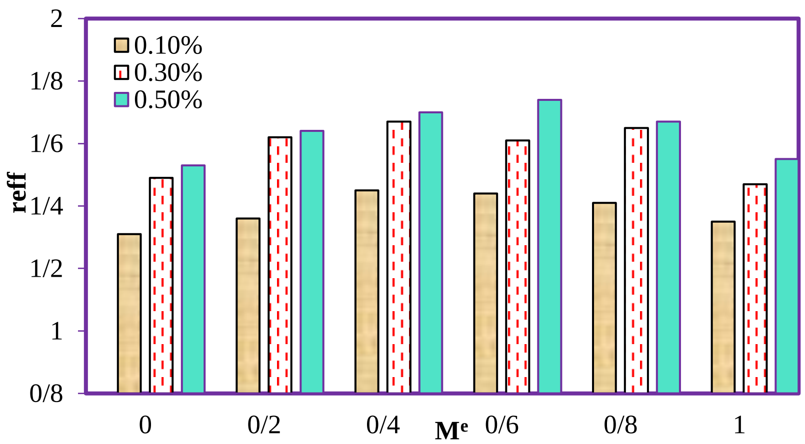
| زاویه ترک (درجه) | ۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۴۰ | ۴۵ | ۴۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $M^e$ | ۱ | ۰/۸۱ | ۰/۶۷ | ۰/۳۵ | ۰/۱۸ | ۰ |
| $K_{If}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰/۸۶۹ | ۰/۸۹۷ | ۰/۶۰۱ | ۰/۳۲۰ | ۰/۱۴۲ | ۰ |
| $K_{IIf}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰ | ۰/۳۶۲ | ۰/۴۹۳ | ۰/۵۰۹ | ۰/۴۹۳ | ۰/۴۹۸ |
| $K_{eff}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰/۸۶۹ | ۰/۹۶۷ | ۰/۷۷۷ | ۰/۶۰۱ | ۰/۵۱۳ | ۰/۴۹۸ |

جدول ۱۰ مقاومت شکست نمونه‌های بتن غلتکی ۰/۵ درصد در مودهای مختلف بارگذاری

| زاویه ترک (درجه) | ۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۴۰ | ۴۵ | ۴۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $M^e$ | ۱ | ۰/۸۱ | ۰/۵۷ | ۰/۳۵ | ۰/۱۸ | ۰ |
| $K_{If}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۳۶ | ۰/۶۱۳ | ۰/۳۲۹ | ۰/۱۵۹ | ۰ |
| $K_{IIf}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰ | ۰/۳۲۱ | ۰/۴۸۹ | ۰/۵۲۲ | ۰/۴۹۹ | ۰/۵۱۲ |
| $K_{eff}\left(MPa.\sqrt{m}\right)$ | ۰/۹۳۲ | ۰/۹۸۹ | ۰/۷۸۴ | ۰/۶۱۷ | ۰/۵۲۳ | ۰/۵۱۲ |




شکل ۱۱ تحلیل مودهای مختلف بارگذاری بر مقاومت شکست بتن غلتکی




شکل ۱۲ تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت شکست بتن غلتکی در مودهای مختلف بارگذاری

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقاومت فشاری و کششی و نیز مقاومت شکست بتن غلتکی حاوی الیاف فولادی بدون توجه به وقوع بحث خورندگی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد. بدیهی است که در نظر گرفتن بحث خورندگی می‌تواند نتایج تحقیق را تحت تأثیر قرار دهد:

۱. مقدار مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن غلتکی در حالت‌های ۷ و ۲۸ روزه در حضور الیاف فولادی بهبود می‌یابند. این مقاومت با افزایش درصد الیاف از صفر به ۰/۵ درصد افزایش می‌یابد.

۲. بار شکست تمام نمونه‌های بتن غلتکی با افزایش درصد الیاف فولادی در تمام مودهای بارگذاری افزایش می‌یابد.

۳. بیشترین مقدار مقاومت شکست مربوط به مود کشش خالص بوده و کمترین مقدار مقاومت شکست در برش خالص رخ می‌دهد.

۴. مناسب‌ترین مقدار الیاف فولادی از نظر مقاومت شکست، مقدار ۰/۳ درصد بتن غلتکی است، چرا که در بیشتر از این مقدار، تفاوت قابل توجهی در مقدار مقاومت شکست ایجاد نمی‌شود. مناسب‌ترین مقدار الیاف از نظر افزایش مقاومت کششی و فشاری مقدار ۰/۵ درصد بتن غلتکی است.

## پیشنهادها

۱. امروزه از روش سطح پاسخ [12,13] و یادگیری ماشین [14,15] در تحلیل نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از این روش‌ها در تحلیل داده‌های مکانیک شکست نمونه‌های بتن غلتکی استفاده گردد.

۲. در این پژوهش استفاده از الیاف فولادی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت شکست بتن غلتکی را بهبود داد، لیکن باید توجه داشت که پدیده خورندگی عملکرد این الیاف را در دراز مدت می‌تواند تضعیف کند. برای کاهش خورندگی می‌توان از الیاف فولادی ضدزنگ، استفاده از پوشش‌های مناسب بر روی الیاف، کنترل میزان نفوذپذیری آب در بتن غلتکی استفاده نمود. همچنین استفاده از روش‌های مناسب زهکشی می‌توانند نفوذ پذیری آب در بتن غلتکی و میزان خورندگی در الیاف را کاهش دهد.

## سپاسگزاری

## مراجع


[1] "Guidelines for the design, implementation and maintenance of concrete paving of roads", *The Plan and Budget Organization*, (2018).

[2] J. LaHucik, S. Dahal, J. Roesler and A. N. Amirkhanian, "Mechanical Properties of Roller-compacted Concrete with Macro-fibers", *Construction and Building Materials*, Vol. 135, pp. 440-446, (2017). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212

[3] W. Zhang, S. Gong and J. Zhang, "Effect of Rubber Particles and Steel fibers on Frost Resistance of Roller Compacted Concrete in Potassium Acetate Solution", *Construction and Building Materials*, Vol. 187, Pp. 752-759, (2018). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.244

[4] S. Fuan, M. Ke, L. Kanghe, L. Kun and M. R. M. Aliha, "Influence of Specimen Geometry on Mode I Fracture Toughness of Asphalt Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 276, pp. 122181, (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122181

[5] N. Vazifehkhah, A. R. Manafpour, "Effects of Steel and Polypropylene Fibers on Tensile Strength of FRC with the Same Base Strength", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol. 42, no. 69, pp. 47-56, (2013).

[6] H. shaddel, M. Kheyry ghojehbigli and A. Enayati Tekleh, "Behavior Pattern of Compressive and Tensile Strength of Structural Lightweight Concrete Consisting perlite, Leca and Steel Fiber", *Analysis of Structure and*

*Earthquake*, Vol. 15, no. 2, pp. 47-57, (2018).

[7] M. Leone, G. Centonze, D. Colonna, F. Micelli and M. A. Aiello, "Fiber-reinforced Concrete with Low Content of Recycled Steel Fiber: Shear Behaviour", *Construction and Building Materials*, Vol. 161, pp.141-155, (2018). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101

[8] P. Sukontasukkul, U. Chaisakulkiet, P. Jamsawang, S. Horpibulsuk, C. Jaturapitakkul and P. Chindaprasirt, "Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand", *Case studies in construction materials*, Vol.11, (2019). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271

[9] F. Seifollahi, Y. Mohammadi, "The effects of nano silica and steel fibers on mechanical properties of roller-compacted concrete pavement", *Concrete Research*, Vol. 13, No. 2, Pp. 31-43, (2020). https://doi.org/10.22124/jcr.2020.14965.1405

[10] M. Abu-Bakr, H. F. Mahmood and A. A. Mohammed, "Investigation of metakaolin and steel fiber addition on some mechanical and durability properties of roller compacted concrete", *Case Studies in Construction Materials*, Vol.16, (2022). https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01136

[11] M. Fakhri, E. Amoosoltani, "The Effect of Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber on Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Pavement", *Construction and Building Materials*, Vol. 137, Pp. 470-48, (2017). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136

[12] E. Rahmani, M. K. Sharbatdar, M. H. Beygi, "The effect of water-to-cement ratio on the fracture behaviors and ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP)", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol.109, pp. 102753, (2020). https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102753

[13] E. Sengun, B. Alam, R. Shabani and I. O. Yaman, "Strength and fracture properties of roller compacted concrete (RCC) prepared by an in-situ compaction procedure", Construction and Building Materials, Vol.271, Pp.121563, (2021). https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121563

[14] M. R. M. Aliha, A. Razmi, A. Mansourian, "The Influence of Natural and Synthetic Fibers on Low Temperature Mixed Mode I+ II Fracture Behavior of Warm Mix Asphalt (WMA) Materials", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 182, Pp. 322-336, (2017).https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.003

[15] B. Golchin, R. Safayi, "Effect of Carbon Fibers on Fracture Toughness of Asphalt Mixtures Using Linear Elastic Fracture Mechanics", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, Vol. 4, no 2, pp. 77-92, (2018), (In Persian).

[16] M. M. Mirsayar, A. Razmi, M. R. M. Aliha and F. Berto, "EMTSN Criterion for Evaluating Mixed Mode I/II Crack Propagation in Rock Materials", *Engineering Fracture Mechanics,* Vol. 190, pp. 186-19, (2018). https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.12.014

[17] M. Delnavaz, K. Eshaghi, "Treatment of Petroleum Wastewater Using new Fe-ZSM-5@TiO2/Ag Nano Photocatalys", Ferdowsi Civil Engineering, Vol. 34, No. 2, pp. 71-86, (2021), (In Persian).

[18] B. Golchin, M. Aliyan and R. Meshkabadi, "Evaluating the Effect of Para-fiber on the Technical Properties of in

Plant Hot Recycled Asphalt Mixture and Determining a Suitable Combination", *Journal of Transportation Research*, Vol. 20, No. 3, pp. 85-102, (2023), (In Persian).
https://doi.org/10.22034/tri.2022.323109.2999

[19] A. R. Kordjazi, F. Pooya Nejad and F. Shahabian, "Modeling the Patch Load Resistance of Plate Girders Using a Support Vector Machine", Ferdowsi Civil Engineering, Vol. 28, No. 2, Pp. 109-124, (2016), (In Persian). https://doi.org/10.22067/civil.v28i2.63162

[20] A. Kordjazi, f. Pooya Nejad, "Prediction of Ultimate Bearing Capacity of Axially Loaded Piles Using a Support Vector Machine", *Ferdowsi Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 71-90 (2012), (In Persian).